.

El problema de la causalidad en la mecánica cuántica

Juan Arana
Universidad de Sevilla

1. Causalidad y azar en la ciencia clásica

Para poder aclarar cómo ha afectado la mecánica cuántica a los conceptos de causalidad y azar, hay que tener en cuenta que esta teoría no surgió como consecuencia de una maduración *conceptual* de la propia física o de los que la cultivaban. Todo lo contrario: nació y creció a contrapelo de la mentalidad dominante, y en cierto modo sigue teniendo en contra las preferencias personales de la mayoría de los que bregan con ella. Sus creadores cuestionaron y redefinieron las principales categorías de determinación, pero no por gusto, sino por necesidad. Casi todos hubieran deseado *otra cosa* muy diferente. Es una teoría que sólo ha contado de un modo parcial y provisional con las simpatías de sus gestores y destinatarios. Sería más exacto decir que han aprendido a *resignarse* a ella. Su fuerza ha residido desde el principio y hasta el presente en *los hechos*. El mundo es como es, no como les gustaría que fuese a los que se encargan de estudiarlo. Y hay muchos a los que no gusta la imagen resultante. A pesar de que la llamemos ciencia *empírica,* los que la crean casi siempre han pospuesto la experiencia a consideraciones lógicas, ontológicas e incluso estéticas. En este banquete los hechos han figurado siempre como parientes pobres, cuya presencia no se puede obviar, pero de los que se espera una presencia complaciente y discreta. Sin embargo, a veces la prima del pueblo rompe el protocolo y hace que salgan a la luz algunos conflictos soterrados. Algo parecido ocurrió en esta ocasión: la naturaleza dijo «*¡No!*» a la camisa de fuerza que pretendía imponérsele. Y lo hizo como ella sabe, produciendo resultados inesperados en los experimentos y suscitando fenómenos refractarios a las rutinas teóricas autorizadas. Hubo que buscar alternativas, empezando por las más aceptables y terminando por las menos gratas. La discontinuidad cuántica pertenecía a esta última clase.

A finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX la actitud dominante en lo que respecta a causalidad y azar era bastante clara. Una mayoría cualificada de físicos creía en la vigencia irrestricta del principio causal, y confinaba el azar en un ámbito estrictamente epistemológico: pensaban que todo está perfectamente determinado por causas físicas, aunque el conocimiento de todas las leyes relevantes y la medición exacta de las magnitudes involucradas fueran de hecho inalcanzables. No menos inaccesible resultaba el problema de resolver satisfactoriamente los cálculos pertinentes. En tales condiciones, la única estrategia pragmáticamente viable era apelar a simplificaciones estadísticas. Al usar ese expediente se aplicaba expresa o implícitamente tres supuestos complementarios:

1) Que, más allá de las insuficiencias teóricas y prácticas del conocimiento humano, existen vínculos objetivos entre todo lo que ocurre en el universo, de manera que en conjunto constituye un despliegue único perfectamente trabado.

2) Que, a pesar de dichas insuficiencias, nuestras mentes son capaces de formular con propiedad el postulado del principio causal.

3) Que los procesos de determinación objetiva de la realidad son compatibles con (e incluso propician) aproximaciones parciales, de la mano del concepto de azar y a través del instrumento de las leyes estadísticas.



2. La crisis de la conciencia causal

Constituía una sorprendente coincidencia que el mundo fuera susceptible de doble lectura: determinista una, probabilista otra. Presuntamente objetiva aunque en la práctica inalcanzable la primera, parcialmente verdadera y accesible a la capacidad cognitiva de nuestra especie la otra. Tal vez fue Franz Exner, miembro de la escuela vienesa de física, el primero en manifestar que todo aquel montaje resultaba inverosímil. Así al menos lo entendió su distinguido seguidor, Erwin Schrödinger:

> Aunque hemos descubierto que las leyes físicas son de carácter estadístico, lo que no implica necesariamente la determinación estrictamente causal de los procesos moleculares individuales, sin embargo la opinión general es que, en realidad, descubriríamos que el proceso individual —por ejemplo, la colisión de dos moléculas de gas— está determinado por una rígida causalidad [...] Fue Franz Exner, un físico experimental, quien por primera vez, en 1919, con perfecta claridad filosófica, lanzó una crítica contra la manera como todo el mundo aceptaba, como algo dado por sentado, el determinismo absoluto de los procesos moleculares. Llegó a la conclusión de que aquello era ciertamente posible, pero de ninguna manera necesaria y, examinando más de cerca, ni siquiera muy probable (Schrödinger, 1975: 21-22).

Aquí había una grieta solapada que minaba la racionalidad científica, y los motivos de que aflorara y creciera no deben ser achacados al desarrollo de la mecánica cuántica, porque, aunque casi coincidieron en el tiempo y el espacio, en realidad, la crisis de la causalidad clásica *precedió* ligeramente y no *sucedió* al surgimiento de la nueva teoría. La observación de Schrödinger que acabo de citar lo indica indirectamente. En 1919 ya se habían descubierto las discontinuidades cuánticas, y en Munich, Gotinga y Copenhague se buscaba con afán una nueva teoría. Pero Exner, Hasenöhrl y otros pioneros del indeterminismo físico se movían en el marco clásico. El propio Schrödinger se inclinaba mucho más hacia el indeterminismo en 1921, cuando tomó posesión de su cátedra en Zürich y pronunció las palabras que acabo de citar, que después de 1927, cuando desarrolló la mecánica ondulatoria. La ola de conversiones al acausalismo que tuvo lugar por esta época no afectó a los pioneros de la nueva teoría, sino a figuras representativas de la vieja doctrina, como Schottky o Nerst (Forman, 1984). Hay indicios de que el fenómeno tiene que ver principalmente con la desmoralización que provocó la catástrofe de la primera guerra mundial y la popularización del pesimismo irracionalista, expuesto con tanta fuerza por Oswlad Spengler y otros.

3. El postulado causal en los creadores de la mecánica cuántica

En realidad, la introducción de la hipótesis cuántica vino de la mano de Planck y Einstein, dos físicos enormemente creativos, pero afectos de todo corazón al racionalismo causalista, del que no quisieron abdicar hasta el fin de sus vidas. Bastará un par de citas para ilustrarlo:

> Y ahora debo declarar explícitamente mi creencia de que la causalidad estrictamente dinámica debe merecer nuestra preferencia, simplemente porque la idea de un Universo gobernado por leyes dinámicas le

.

> da una más amplia y profunda aplicación que la idea meramente estadística, la cual restringe desde el principio el alcance del descubrimiento; en efecto, en la física estadística existen tan sólo leyes que se refieren a grupos de fenómenos. Los acontecimientos particulares, como tales, son admitidos y reconocidos expresamente, pero la cuestión de su seriación gobernada por leyes es considerada absurda basándose en fundamentos *a priori*. Esta forma de proceder no me parece que sea satisfactoria, y no he sido capaz de encontrar ni el más leve motivo que obligue a renunciar a la aceptación de un universo estrictamente gobernado por leyes, si bien sea un problema a tratar el descubrimiento de la naturaleza de las fuerzas físicas o espirituales que nos rodean (Planck, 1961: 104).

> El individuo que está totalmente imbuido de la aplicación universal de la ley de la causalidad no puede ni por un instante aceptar la idea de un ser que interfiera en el curso de los acontecimientos... siempre, claro está, que se tome la hipótesis de la causalidad verdaderamente en serio (Einstein, 1983: 226).

La evidencia es irrecusable: en modo alguno cabe presentar la mecánica cuántica como una construcción urdida desde el principio por una mentalidad antideterminista. Ocurre más bien lo contrario. En una carta de 1919 dirigida a la esposa de su amigo Max Born, Einstein comentaba lo siguiente: «Lo que usted llama "materialismo de Max" es sencillamente su modo causal de ver las cosas, que siempre responde a la pregunta de "¿por qué?", pero nunca a la de "¿para qué?"» (Einstein, Born, 1973: 25). Por aquellos años ambos hombres pensaban de la misma manera. Luego se produjo entre ellos una divergencia creciente, de lo cual levantó acta el mismo Einstein en otra carta de 1944: «En nuestras perspectivas científicas nos hemos vuelto antípodas. Tú crees en el Dios que juega a los dados y yo creo en la ley y la ordenación total de un mundo que es objetivamente y que yo trato de captar de una forma locamente especulativa» (Einstein, Born, 1973: 189). Su colega se había dejado arrastrar por la evidencia de los hechos. Él no; por eso califica su propia actitud de «locamente especulativa». Si los hechos se atrevían a desafiar la infalibilidad del principio causal, peor para ellos. O peor para Einstein. En cualquier caso no tenía intención de transigir ni tampoco lo hizo. Lo curioso es que, mientras la evidencia fáctica se ha mantenido obstinadamente adversa desde entonces, las simpatías de muchos físicos han acompañado al terco solitario que se negó a aceptarlo. Autores tan dispares como Gerard 't Hooft (2001: 28) y a su manera el propio Roger Penrose (1996: 256) echan miradas nostálgicas al viejo campeón de la racionalidad causal.

4. Determinismo y continuidad

Es bien conocido el hecho que desencadenó este vuelco de la mentalidad dominante: la correcta inteligencia del espectro de radiación del cuerpo negro hizo que Max Planck propusiera una discontinuidad básica en los procesos de trasferencia de energía. Era una discontinuidad minúscula en comparación con las cantidades involucradas en cualquier proceso macroscópico, pero no dejaba de suponer un contratiempo importante, precisamente por afectar al nivel más básico conocido de la realidad física. Por algún tiempo se pensó que la



continuidad podría ser restablecida mediante refinamientos teóricos o gracias a descubrimientos experimentales relativos a procesos aún más elementales. Pero tras la aplicación que hizo Einstein de la hipótesis cuántica a la naturaleza de la luz, la crisis se agravó en lugar de superarse. El problema fue debatido en la primera reunión Solvay que tuvo lugar en 1911 y al término de la misma Henri Poincaré dictaminó con mucha sagacidad que la ruptura de la ley de continuidad ponía en un brete el mismo principio causal (Arana, 2001: § 69).

Conviene valorar adecuadamente la trascendencia filosófica de aquellas discusiones. El modelo clásico continuista desembocaba en la ley de Rayleigh-Jeans, contradicha por la evidencia empírica, reflejada por la ley de Wien (otro de los futuros oponentes a la mecánica cuántica estándar). Que los hechos contradigan una ley fundada en teorías bien establecidas y favorezcan otra que está en pugna con la teoría no es insólito en la historia de la ciencia. Pero hay principios tan común y firmemente recibidos que, en lugar de ser considerados como leyes empíricas de alto nivel, se pretende convertirlos en postulados necesarios de la razón, incluso (de acuerdo con la conceptuación kantiana) en juicios sintéticos *a priori*. Que una evidencia fáctica pueda problematizarlos resulta escandaloso, pero si los hechos son suficientemente inequívocos, al final no hay más remedio que aceptarlo. Entre 1910 y 1925 un número creciente de físicos se atrevió a dar ese paso crucial. Cabría reconstruir el proceso conceptual teniendo en cuenta no sólo la *ley de continuidad* y el *principio causal,* sino también el *principio de identidad.* En efecto: pretender que ningún experimento u observación sirva para desmentir la idea de que todo tiene una causa *física* (y aquí el apellido es importante), es más o menos lo mismo que declarar contradictoria la presencia de un evento desconectado del resto del acontecer cósmico. La forma más directa de evitar que eso ocurra es convertir la historia del universo en algo tan bien integrado que constituye algo así como un solo *factum* de proporciones gigantescas: un conglomerado disperso en apariencia, pero en el fondo un todo monolítico. El efecto está ligado necesariamente a la causa, porque causa y efecto forman parte indisoluble de lo mismo. No es, desde luego, la única forma de concebir y acreditar el principio causal, pero es la única que le confiere una validez incuestionable. El monismo físico expresa la identidad subyacente de todo lo que ocurre, y en su vinculación necesaria causas y efectos se manifiestan como fundamentalmente idénticos, puesto que constituyen fachadas contrapuestas de una identidad sin fisuras. ¿Y de qué modo cabe asegurar la identidad disimulada de la causa y el efecto? Es evidente que nada mejor para ello que la ley de continuidad, porque estatuye que entre pasado y presente, motor y móvil, antecedente y consecuente, nunca hay una distancia que permita problematizar la equivalencia de los términos, sino un gradiente que difumina y en último término elimina cualquier atisbo de inidentidad. Recuérdese que la continuidad de una función es requisito indispensable para que sea derivable, es decir, para que podamos describir con toda exactitud su evolución por medio de cambios de valor que pueden hacer a voluntad más y más pequeños, hasta volverse prácticamente nulos si hacemos que el entorno en que se producen sea, él mismo, *infinitesimal*. Cuando la causa y el efecto están suficientemente cerca, llegan a parecerse todo lo que queramos, y la continuidad asegura la posibilidad de acercarlos hasta disolverlos en un baño de identidad.

Esa fue la razón de que las ecuaciones diferenciales se convirtieran en el instrumento *par excellence* de la ciencia en la época en que el principio causal adquirió su máximo crédito y también explica la resistencia de los físicos a abandonarlas. Y, en efecto, no descansaron hasta que, de la mano de Schrödinger, encontraron una que también se adecuaba al nuevo escenario de presunta discontinuidad. Una matemática de la discontinuidad, como el



álgebra de matrices que ideó Heisenberg, no tenía para ellos ni la mitad de atractivo.

Intentaré presentar la misma idea con un ejemplo. Supongamos que vivimos dentro de una cultura mítica y nos preguntamos por qué la Tierra se mantiene quieta en mitad del firmamento en lugar de precipitarse en los abismos cósmicos como las piedras que caen o las cataratas que se desploman. Una posible explicación es que hay una deidad menor, Atlas, que lleva el globo terráqueo sobre sus esforzados hombros. La idea satisface, puesto que hay una *continuidad:* allí mismo donde termina nuestra esfera empieza el sobrehumano músculo que la sustenta. ¿Y por qué no se hunde Atlas con toda su carga? Porque Zeus ha puesto un sólido terreno bajo sus pies. De nuevo hay aquí una tranquilizadora continuidad. La serie Tierra – Atlas – Suelo cósmico no está rota. Pero si preguntáramos qué sostiene el suelo, ya nos estamos poniendo pesados. Zeus es el dios supremo y nadie puede quitar lo que él pone. Puede que sea así, pero la continuidad de la explicación ha sido quebrada. La quiebra hubiera sido mucho más inaceptable si Atlas, por miedo a mancharse, hubiera pretendido dejar un hueco de algunos centímetros entre sus hombros y la Tierra, o si el dios Hermes le hubiera prestado sus alas tobilleras para que pudiera revolotear a algunos metros del suelo. Introducir discontinuidades entre agentes y pacientes de la relación causal siempre es doloroso, pero resulta intolerable si provienen de instancias subalternas. Parece que este tipo de situación se ha presentado con frecuencia. En India, por ejemplo, algunas tradiciones enseñan que la Tierra descansa sobre cuatro elefantes parados sobre el dorso de una tortuga. La tortuga, a su vez, guarda equilibrio sobre una cobra. No consta qué o quién aguanta a la cobra, y haría falta un zoo inmenso para acallar a todos los preguntones compulsivos.

Evitar cualquier solución de continuidad supone caer en un laberinto interminable. Hay posibilidad de evitarlo si decretamos que preguntar por el último eslabón denota un temperamento metafísico rechazable. Lo malo del asunto, sin embargo, es que el espectro del infinito no sólo aparece al final de la cadena, sino también en medio de ella, como demostró en su momento Zenón de Elea.

5. Causalidad y discontinuidad

La última consideración formulada nos lleva de nuevo a la mecánica cuántica. Para que la flecha recorra todo su camino, ha de salvar primero la mitad y antes la mitad de la mitad, la mitad de la mitad de la mitad, y así sucesivamente. La dificultad para conseguirlo es soportable si se acepta la ley de continuidad y la aplicabilidad del cálculo infinitesimal a la física. De lo contrario, no hay modo de evitar otra de las paradojas de Zenon: la flecha está quieta cuando se encuentra en un lugar cualquiera, y deslocalizada cuando se mueve. Aquí se encuentra precisamente el punto crucial de la nueva doctrina: la imposibilidad de atribuir simultáneamente a los cuerpos el concepto de localización en el espacio y el de movimiento. La localización implica la identidad del objeto consigo mismo en lo que atañe al último y más tangencial atributo (el lugar que ocupa); el movimiento, la ruptura de dicha identidad mediante un cambio de atribución. Si hubiese estricta continuidad entre las diversas posiciones ocupadas por el móvil y también en la misma variabilidad de movimiento, cabría refutar o al menos soslayar la paradoja de la flecha con el apoyo del tándem Newton-Leibniz. Pero entonces tendrían que satisfacer las exigencias de la continuidad sin mácula *todas* las nociones que la física emplea para conceptuar el cambio: espacio, tiempo, velocidad, aceleración, momento, fuerza… y energía. Éste último resultó ser el pilar más débil del edificio. Los



demás acabaron contagiándose de su fatiga, en lugar de compensarla. El punto de no retorno se produjo cuando Niels Bohr introdujo discontinuidades en los presuntos movimientos del electrón dentro del átomo.

Imaginemos por un instante lo que supone aplicar el principio causal en un contexto de discontinuidad. Un electrón está en la tercera órbita y pasa a la segunda. Para ello necesita desembarazarse de un exceso de energía, lo que consigue mediante la emisión del cuanto correspondiente. ¿Cuándo y por qué se producirá el preceptivo acontecimiento? El cuándo y el porqué están íntimamente entrelazados, pero para correlacionarlos con exactitud la discontinuidad de los flujos energéticos supone un obstáculo mayor. Como escribió Rutherford a Bohr a raíz de su propuesta: «Me parece que usted debería suponer que el electrón sabe de antemano dónde va a pararse». Tratemos de plantear el dilema en los términos más simples: «algo» tiene que ocurrir «dentro» o «fuera» del electrón para que el cambio de ubicación se produzca. Ahora bien, ese «algo» se sitúa desde el punto de vista energético (*ergo* causal) por debajo del umbral que la discontinuidad cuántica establece como irresoluble (el cuanto de acción de Planck). Por consiguiente, la «causa» no tiene otro remedio que «emigrar» fuera del ámbito físico, en el sentido de que tenemos que situarla donde ya no resulta objetivable. Si es así, la única posibilidad de restaurar el sentido clásico de la causalidad es postular (y a ser posible demostrar) la existencia de procesos físicos subcuánticos. Acudiendo al ejemplo precedente, tendríamos que encontrar la «cobra subcuántica» debajo de la «tortuga cuántica»; de otro modo no habría otro remedio que reformular en profundidad el principio causal. Poincaré en 1912 y Rutherford en 1913 vieron con toda nitidez esta palmaria consecuencia, obscurecida sin embargo en el debate subsiguiente. En 1927 no hubo más remedio que acogerla por el procedimiento de urgencia. La cuestión se había embrollado tanto que para disipar algunos espejismos fue necesario que John von Neumann propusiera un discutido teorema que excluía la presencia de causas ocultas. No obstante, los elementos de juicio disponibles eran suficientemente esclarecedores para que cualquiera llegara a la misma conclusión sin grandes sofisticaciones matemáticas, como demuestra la siguiente observación de Alfred Landé:

> Continuando de esta forma se hace evidente que la hipótesis de las causas ocultas nos pediría que creyésemos, primero, que cada uno de los átomos está predestinado a presentar una reacción predeterminada ante cada posible ensayo futuro con un filtro, y segundo, que los destinos de los diversos átomos están coordinados entre sí de tal modo que nos presenten unas relaciones estadísticas determinadas (más las fluctuaciones gaussianas) entre los números correspondientes a los que hayan pasado y los que hayan quedado bloqueados, todo ello en armonía con la teoría matemática de los errores; lo cual exigiría una previsión del alcance verdaderamente fantástico, un fraude gigantesco montado por un mal demonio dedicado a fingir la existencia de aleatoriedad donde habría orden oculto. *No se necesita la demostración de von Neumann* para ver que ante una distribución estadística cualquiera, cuantista o precuantista, las cadenas causales no llevan a ninguna parte; cosa que debería expulsar toda esperanza de restaurar la causalidad individual a un nivel más profundo, subcuántico (Landé, 1968: 51).

Todas las pegas que David Bohm y tantos otros han puesto a la demostración de Neumann, así como las refinadas limitaciones que le han encontrado dejan intacta la cuestión esencial. Si en la naturaleza hay discontinuidades no resolubles, no es lícito aplicar un sentido del principio causal que remite, a través de la continuidad, a la identidad monista de la realidad natural. La discontinuidad cuántica, si verdaderamente es un dato básico, impone un modelo de universo físico más disperso, menos laplaciano y, en último término, menos

.

parmenídeo que el que defendían los últimos representantes de la física clásica.

6. Los dos modelos causales de la ciencia clásica

Se ha discutido mucho sobre si la modelización dominante de la teoría, la Interpretación de Copenhague, tiene o no tiene un carácter idealista. Me he ocupado del asunto en otro lugar (Arana, 2000) y defendido que sus representantes en modo alguno apuestan por desligar la física de sus referentes reales. Es verdad que algunos de ellos, como Heisenberg y Jordan, apelaron a argumentos tomados del neopositivismo para desembarazarse del realismo ingenuo de sus críticos, lo cual no es óbice para que haya que pueda valorarse su posición como un realismo matizado, un poco en la línea de lo que muchos años después Bernard d'Espagnat propuso llamar «realismo lejano»[1]. Sostengo que no es más realista quien pretende que los conceptos de la física clásica reflejan fielmente la estructura de la realidad, que el que emplea la realidad como piedra de toque para estudiar hasta qué punto dichos conceptos la objetivan con fidelidad y en qué medida la falsean. No obstante, si ceñimos la discusión al problema causal, no perderemos del todo la posibilidad de iluminar ese otro aspecto del contencioso. Lo importante, en último término, no es si la mecánica cuántica confirma o atenúa la validez del principio causal, sino si a través de ella conseguimos avanzar en el conocimiento de la genuina presencia de causalidad en el mundo.

Ante el *impasse* en que desembocó el planteamiento etiológico clásico como consecuencia de la discontinuidad cuántica se tuvo que escoger entre dos opciones. La física clásica usa, en efecto, dos tipos de leyes: deterministas y estadísticas. Éstas últimas son a su modo tan deterministas como las otras, pero a diferencia de ellas lo que determinan son poblaciones de objetos pertenecientes a determinadas clases tomadas globalmente, mientras que las primeras pretenden prescribir el ser o el devenir de cada objeto particular perteneciente a ellas. Si me dicen que al cumplir 60 años mi esperanza de vida es de 22 más, nadie me garantiza que los viva de hecho. Pero si la afirmación es correcta, entonces eso es lo que en promedio subsistirán todos los componentes de mi generación que han llegado a los 60. Las leyes deterministas predeterminan (si son buenas) a los individuos y por ende también a los colectivos formados por ellos (aunque a veces sea demasiado engorroso efectuar las totalizaciones correspondientes). Las leyes estadísticas predeterminan a los colectivos y afectan a sus miembros individuales tan sólo a título de probabilidad o propensión. En este último sentido determinan menos que las otras, pero sólo son buscadas y apreciadas en la medida en que predeterminan también.

Cuando los físicos se decidieron a asumir que la discontinuidad cuántica podría llegar a ser un rasgo objetivo del universo, perdieron la confianza en el hallazgo de leyes deterministas para regir los procesos donde tales discontinuidades desempeñaban un papel relevante, pero trataron de inmediato de encontrar leyes estadísticas y, en efecto, las hallaron por doquier. Agrupaciones homogéneas de átomos radiactivos, electrones excitados, espines

[1] «Si quiero persistir en mi actitud realista me veo incitado, pues, a optar por un realismo no físico que puedo denominar teoría de lo real velado, elección que sigue siendo aún muy indeterminada, pero que, sin embargo, posee una significación. Entiendo por realismo no físico, o teoría de lo real velado, todo realismo que no satisfaga la esperanza [...] que describe el postulado del realismo físico [concepción según la cual es posible describir la realidad independiente tal como es en verdad, y ello por medio de la física]. [...] Llamaré "realismo próximo" a toda visión del mundo en la cual todos los elementos de la realidad se supone que están adecuadamente descritos por nociones que son para nosotros cercanas y familiares. Llamaré "realismo lejano" a toda perspectiva que no satisfaga dicha condición» (d'Espagnat, 1983: 127).

alineados, partículas en interacción, etc., siguen fielmente las prescripciones estadísticas que los investigadores detectan tanto por medio de experimentos y mediciones, como a través de cálculos y deducciones. Existe, como es natural, una diferencia importante entre las leyes estadísticas de la física clásica y las de la mecánica cuántica: aquéllas se basan en simplificaciones en principio superables, es decir, se detectan después de renunciar a una información que no tiene por qué ser inalcanzable, o a un seguimiento más pormenorizado de los procesos estudiados que tal vez en otras circunstancias sea posible hacer. Las nuevas leyes estadísticas cuánticas no disfrutan del mismo horizonte de perfectibilidad, puesto que adquirir la información necesaria para determinar individuos y no sólo poblaciones está en contradicción con las limitaciones derivadas de la discontinuidad cuántica. Continúa siendo legítimo especular con la existencia de tales especificaciones, pero para llegar a objetivarlas habría que derribar tanto la mecánica cuántica como la verdad de los hechos que la avalan, lo cual, no hace falta repetirlo, era y sigue siendo una posibilidad extraordinariamente remota.

7. Un nuevo sentido para el determinismo causal

Pero la cosa no acaba aquí. Quizá lo más interesante de todo lo que se refiere a la cuestión causal ha sido el descubrimiento de un nuevo tipo de ley determinista radicalmente diferente del usual. Se podría incluso hablar de un dualismo legal y causal en mecánica cuántica, que los físicos empezaron a detectar a raíz de la aparición en 1926 de la *mecánica ondulatoria*. A diferencia del grupo que trabajaba en Gotinga y Copenhague, Schrödinger escogió el lenguaje de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Tal instrumento exige que exista al menos una magnitud continua, que fue simbolizada en este caso con la letra griega Ψ, y cuya evolución espaciotemporal era perfectamente gradual y estaba completamente predeterminada por la ecuación que lleva el nombre de su descubridor. En cambio, no estaba claro al principio su significado físico, aunque desde luego su comportamiento era el de una onda que se propaga sin interrupciones en el ámbito que le corresponde[2]. La vieja guardia de la física echó las campanas al vuelo, puesto que vio la ocasión de desterrar las discontinuidades cuánticas y restaurar el principio causal en todo su vigor. La primera confrontación se produjo en una conferencia de presentación del nuevo formalismo celebrada en la Universidad de Munich. Heisenberg estaba de paso en la ciudad y asistió a ella. Manifestó en el debate que, puesto que la mecánica ondulatoria no cuestionaba el carácter elemental del cuanto de acción, en modo alguno era lícito considerarla como una vuelta a la vieja descripción determinista. Los acontecimientos se precipitaron a partir de ese momento. La idea de Schrödinger de que los «saltos» cuánticos pudieran corresponder a súbitos «empaquetamientos» de sus «ondas» se mostró inviable tras la tensa discusión que mantuvo en Copenhague con Bohr, y poco después el mismo Bohr propuso el *principio de complementariedad,* Heisenberg encontró sus *relaciones de indeterminación* y Max Born desarrolló la interpretación probabilista de la onda Ψ. A partir de entonces y hasta ahora el debate sobre cómo interpretar física y filosóficamente la teoría cuántica ha sido incesante. Pero en definitiva sigue estando vigente —y con la misma firmeza que al principio— la idea de que en lo relativo a eventos individuales sólo es posible hacer pronósticos probabilistas, no obstante lo cual

[2] El cual por cierto no es el espacio-tiempo de la física, sino un espacio de configuración especial.

hay *algo* paradójicamente entretejido con ellos que evoluciona con perfecta continuidad y determinación. Una descripción aproximada de la situación sería la siguiente: hemos definido una serie de conceptos (posición en el espacio-tiempo, masa-energía, velocidad, momento, etc.) como si se pudieran atribuir con ilimitada precisión a las entidades que estamos estudiando. No obstante, la discontinuidad de los procesos a nivel elemental obliga a que la precisión efectivamente alcanzable sea siempre unilateral: si medimos con mucha precisión la posición, se desenfoca el momento y, si nos interesa afinar en la medición de la energía, la localización temporal quedará emborronada, etc. Es un hecho que se ha comprobado hasta la saciedad, pero admite diversas interpretaciones, entre las que destacaré dos:

1) Los conceptos tienen un valor objetivo de verdad, es decir, los electrones, protones, etc., realmente están en un lugar exacto y a la vez tienen una cantidad de movimiento precisa, pero la teoría nos prohíbe medirlos con precisión al mismo tiempo, obviamente porque la naturaleza no nos pone fácil el empeño. Tal vez una teoría más completa o/y unos dispositivos experimentales más refinados conseguirán algún día romper la barrera. Es más o menos la posición de Einstein y otros críticos a la versión «oficial».

2) Los conceptos tienen un valor de verdad limitado, de manera que cuando queremos atribuirlos con gran precisión a la realidad, la falseamos. Lo único que hace la mecánica cuántica es incorporar dicha limitación a la teoría física, y procurar seguir adelante con una descripción *realista*, pero parcial y restringida, de una realidad que de otro modo se nos escaparía o quedaría enterrada bajo nuestros prejuicios conceptualistas.

Hay muchas otras opciones que en este momento sería enojoso detallar. Se trata, obviamente, de una discusión filosófica y muchos científicos la consideran carente de sentido o al menos estéril. Pero hay poco riesgo de que tales espíritus lleguen a asomarse jamás a este texto. En todo caso no escribo para ellos. Sin embargo, a mí y al hipotético lector cómplice nos interesa bastante lo que ellos, como *profesionales* de la mecánica cuántica, *hacen*. Que es más o menos lo siguiente: aceptan que conceptos objetos de discusión *sí* pueden ser atribuidos a los entes que componen el universo (fotones, electrones, átomos, incluso moléculas, etc.). Pero en vez de determinarlos con precisión eligen moverse en el terreno de lo *virtual* y contemplan el conjunto de todos los valores posibles de las controvertidas magnitudes, valorando la probabilidad de que el sistema se encuentre en cada uno de ellos según la información disponible. Por ejemplo: habrá un 57% de probabilidad de que el electrón pase por primera rendija de una pantalla que hemos puesto ante él y un 63% de que lo haga por la segunda. Si no levanto el velo que cubre el misterio de cuál de las dos posibilidades ha sido actualizada, puedo contemplar que a todos los efectos —a despecho de su presunta y permanente localización en un punto concreto— el electrón ha pasado por ambas rendijas a la vez, y de manera que un 57% de él lo ha hecho por la primera y un 63% lo ha hecho por la segunda. Más aún: estoy en condiciones de pronosticar cómo esas hipotéticas vidas posibles del electrón se proyectan hacia adelante tomando simultáneamente todas las bifurcaciones que se abren ante él. Después de unas cuantas pantallas semejantes, sus expectativas de acabar finalmente en alguno de los posibles destinos finales habrán evolucionado, y ¡aquí está el portento!, han evolucionado suave y determinísticamente. En este aspecto todo funciona como una máquina bien engrasada que desconoce las rupturas y sobresaltos cuánticos. De hecho (y salvando las matizaciones técnicas de rigor) eso es lo describe con precisión la ecuación schrödingeriana: cómo se superponen, interaccionan y codeterminan las diversas posibilidades que se abren (ponderada y no indiscriminadamente) ante un o un conjunto



de objetos físicos y a lo largo de una evolución más o menos prolongada. Debe quedar bien entendido que la magia solamente se mantiene mientras el velo de la ignorancia mantiene oculto lo que *realmente* ha hecho el electrón en cada uno de los pasos presumiblemente dados (si es que *realmente* lo ha hecho, punto más que dudoso). En el mismo momento que una mano indiscreta enciende la luz, dispara la cámara y registra el dato, la ecuación *colapsa* y disciplinadamente encontramos que se ha actualizado una y tan sólo una de las muchas posibilidades en principio abiertas. Dicho del modo más paradójico: el electrón pasa por *ambas* ventanas excepto si nos empeñamos en comprobar por *cuál* de ellas lo hace; entonces sólo pasa por una de ellas, y el resto de lo que ocurra con él ya no será igual. Se acepta entonces que el electrón se encuentra *realmente* (aunque para alguien de criterio más escrupuloso sería preferible decir: *a cualquier efecto relevante*) en una *superposición* ponderada de todos los estados que se le pueden atribuir potencialmente, en tanto no le forcemos a *actualizar* una de sus potencias con exclusión de las que son incompatibles con ella. La teoría proporciona en definitiva dos tipos de procedimientos epistémicos, según nuestra curiosidad sea vehemente o limitada. Quien quiera anticipar la respuesta a sus preguntas debe pagar por ello con la renuncia al determinismo; quien desee retener el determinismo, debe reprimir sus ansias de saber qué es lo que de hecho ha efectuado el objeto estudiado. Roger Penrose resume esa curiosa doblez epistemológica de la siguiente manera:

> El proceso determinista **U** parece ser la parte de la teoría cuántica de mayor interés para el trabajo de los físicos; no obstante, los filósofos están más intrigados por la reducción **R** del vector de estado (o, como a veces se le describe gráficamente: colapso de la función de onda) no determinista. Ya consideremos **R** simplemente como un cambio en el "conocimiento" disponible del sistema, o ya lo tomemos (como yo lo hago) como algo "real", disponemos realmente de dos modos matemáticos completamente distintos para describir cómo cambia con el tiempo el vector de estado en un sistema físico. En efecto, **U** es completamente determinista, mientras que **R** es una ley probabilista; **U** mantiene la superposición compleja cuántica, pero **R** la viola totalmente; **U** actúa de una forma continua, pero **R** es descaradamente discontinuo (Penrose, 1991: 317).

Hay una larga nómina de filósofos, en la que destacan Karl Popper, Mario Bunge y varios otros, que han protestado serena o coléricamente contra esta aparente mezcolanza indiscriminada de ontología y epistemología. La acusación de *idealismo* está en el aire y no faltan quienes, haciendo virtud de la necesidad, asumen la imputación con todas sus consecuencias, desde el eminente físico Eugene Wigner hasta los recientes expositores Brice Rosenblum y Fred Kuttner (2010). La discusión es tan enrevesada como interesante, pero voy a procurar zafarme de ella en la medida que no sea obligado para dirimir la cuestión de la causalidad. Al fin y al cabo, el principio causal es susceptible de reinar o de no hacerlo tanto en el mundo de Berkeley como en el de Hobbes. Hay no obstante dos puntos que no es lícito eludir: la presencia y funciones del sujeto del conocimiento y el estatuto del azar.

8. Un estatuto diferente para el azar

El segundo asunto es más fácil de tratar. Entre los últimos representantes del punto de vista clásico se considerada al azar como una cuestión meramente epistémica y se asimilaba a un conocimiento incompleto, aunque

satisfactorio (e incluso homologable) por razones prácticas. El azar cuántico también es epistémico (en un sentido trivial todos los conceptos que usamos lo son), pero no es lícito descartar que también sea algo más: un procedimiento para caracterizar de un modo no necesariamente incompleto ciertos rasgos de la realidad, en cuyo caso poseería un correlato ontológico. No es que la teoría lo asevere explícitamente, pero tampoco prohíbe (como de alguna forma hacía la interpretación ortodoxa de la física clásica) que lo *casual* corresponda en parte al *en sí* del universo. Para decirlo de una forma provocativa, la mecánica cuántica es *más tolerante* que la mecánica clásica a la hora de calibrar el alcance del concepto de azar. ¿Y por qué habría de ser de otro modo? No hay ninguna contradicción en conjeturar que la realidad sea un conjunto de entidades y procesos que no acaban de confluir en un único principio relevante tanto del ser como del devenir. Allá cada cual con su opción preferente por la unidad o la dispersión. En todo caso, la discontinuidad cuántica impone una especie de censura que impide resolver la cuestión en el ámbito de la física. *Ignoramus et ignorabimus*. La cuestión debe ser transferida a la metafísica, disciplina para la cual ningún hueso es tan duro que no merezca la pena intentar roerlo. Esto no es *idealismo*: es pura y simplemente sensatez informada.

Es un hecho innegable que la semántica de la palabra azar (y de las voces sinónimas) ha oscilado a lo largo de la historia entre lo ontológico y lo epistémico: azar de los entes que no están rígidamente encadenados en un esquema causal o legal, y azarosa aproximación conceptual a entes que sólo conocemos imperfectamente. Casi con seguridad el azar nunca dejará de estar presente en todo lo que tiene que ver con nuestras descripciones y pronósticos, ahora bien, ¿estará justificado alguna vez excluirlo de la valoración objetiva de la realidad? Hay que resignarse a trabajar siempre con fotografías borrosas. ¿Es un problema de la cámara nada más, o de la cámara y también del objeto fotografiado? Los autores que son proclives a detectar derivas idealistas en algunas interpretaciones de la mecánica cuántica se aferran de vez en cuando a una concepción decimonónica de azar, y por eso cuando emplean la palabra piensan sistemáticamente en limitaciones subjetivas del conocimiento. Sería muy conveniente, para evitar recaer en criterios de valoración caducos, recordar que el concepto de azar ha presupuesto repetidas veces a lo largo de la historia propiedades que en absoluto dependen de la imperfección del conocimiento humano, sino que evocan condiciones objetivas. Excluir por principio la validez de tales conceptuaciones es un síntoma de dogmatismo apriorista. Las extrañas propiedades de los objetos físicos que tienen que ver con la no localidad y el entrelazamiento cuántico avalan la sospecha de que el problema no está en el uso particular que damos a los conceptos físicos fundamentales (espacio, tiempo, masa y energía) ni tampoco a los procedimientos físicos de medida, sino en la entraña misma de dichos conceptos. Hay, en efecto, múltiples y crecientes evidencias de que la introducción de nociones relacionadas con el azar es insoslayable para hacer un uso realista de aquéllos:

> La idealización tiene lugar al acercarnos a la realidad mediante determinados conceptos que resultan satisfactorios para darnos una descripción de los fenómenos; es así como obtenemos el rostro o perfil de la realidad. Es lo que sucede, por ejemplo, en la mecánica con los conceptos de lugar, tiempo, velocidad, masa, fuerza. Con ellos delimitamos la imagen de la realidad; o, si se quiere, la estilizamos, ya que al mismo tiempo renunciamos a todos aquellos aspectos de los fenómenos que no se pueden abarcar con aquellos conceptos (Heisenberg, 1974: 252).

Tampoco conviene olvidar que, como fue establecido en capítulos precedentes, la noción de azar es



esencialmente *relativa.* No estamos hablando de un azar genérico esencial, sino de *azar cuántico,* un azar que se presenta y cuyo alcance se limita al uso de los medios explicativos proporcionados por esta teoría. Extrapolarlo fuera de ella carece de validez y sentido. Desde el punto de vista filosófico la cuestión a decidir es si, como pretenden sus más destacados creadores, los límites impuestos por la mecánica cuántica a la determinabilidad de la realidad son o no los mismos que los límites objetivos de los conceptos físicos clásicos en general. Yo me inclino decididamente a aceptar que sí, por los argumentos que he intentado exponer. Una vez que se admiten tales límites, será imprescindible hablar de azar en física en tanto no se disponga de recambio conceptual para las magnitudes fundamentales clásicas, que de acuerdo con el enunciado del principio de correspondencia también desempeñan una función insustituible en mecánica cuántica:

> La teoría cuántica se caracteriza por el reconocimiento de una limitación esencial de las ideas físicas clásicas cuando se las aplica a los fenómenos atómicos. La situación que con ello se crea es de una naturaleza peculiar, puesto que nuestra interpretación de los datos experimentales se apoya de manera fundamental en los conceptos clásicos (Bohr, 1988: 98).

9. Causalidad cuántica y subjetividad

Los críticos de la interpretación de Copenhague consideran inadmisible la intromisión de elementos subjetivos en procesos donde en buena lógica realista deberían brillar por su ausencia. Su principal empeño es disociar este, digamos, «añadido hermenéutico», de la parte «propiamente científica» de la teoría, a la que en cambio no ponen reparo alguno. Einstein, al que dichas voces discordantes tratan con particular respeto, censuraba no tanto la justicia de la versión propuesta por Bohr y Heisenberg como la pretensión de que sea imposible superar los límites impuestos por la mecánica cuántica mientras no abandonemos los conceptos clásicos de la física. Discrepaba porque era partidario de no poner ninguna limitación al principio causal, y no porque viera en sus adversarios una peligrosa inclinación hacia el idealismo. Al fin y al cabo, en su misma línea estaba Schrödigner, quien como cultivador privado de la filosofía profesaba un idealismo radical (Schrödinger, 1958). Popper en cambio, no puso mayor reparo a abandonar la versiones más estrictas del principio causal, desarrollando toda una teoría de las *propensiones* (Popper, 1992) y argumentando en pro del *indeterminismo* (Popper, 1986). Pero estaba decidido a purgar la mecánica cuántica de elementos subjetivo-idealistas, lo cual le llevó a sostener con Bohr pretenciosas controversias, e incluso se animó a proponer un experimento mental no demasiado bien concebido, que más tarde reconoció que como el mayor error cometido en toda su vida. Durante años decidió callar para reponerse del disgusto, pero cuando finalmente se decidió a hablar (en el tercer volumen del *Post Scriptum* a la *Lógica de la investigación científica*) profundizó aún más en un antideterminismo que le aproximaba a los defensores de la Interpretación de Copenhague, al tiempo que seguía rechazando sus pretendidas contaminaciones subjetivistas. En otras palabras, coincidía con ellos casi al cien por cien en la valoración ontológica de la física y muy en particular en el alcance y sentido del principio causal. Pero reafirmaba su decisión irreversible de establecer una separación muy neta entre el sujeto del conocimiento y la plasmación objetiva de las teorías.

.

> La perspectiva de que las teorías no son nada más que instrumentos o artificios para calcular, se ha puesto de moda entre los teóricos cuánticos, debido a la doctrina de Copenhague de que la teoría cuántica es intrínsecamente ininteligible porque sólo podemos entender «imágenes» clásicas, tales como las «imágenes de partículas» o las «imágenes de ondas». Yo creo que ésta es una doctrina equivocada e incluso perversa (Popper, 1985: 64).

La defensa popperiana del «sentido realista» de las *teorías científicas* se basa en que él relativiza en cambio los *sistemas conceptuales,* de los que puede haber distintas alternativas intercambiables que no alteran el significado profundo de las teorías:

> El sistema conceptual, por otro lado, es intercambiable y es uno entre los varios instrumentos posibles que pueden usarse para formular la teoría. El sistema conceptual proporciona simplemente un lenguaje para la teoría; quizá un lenguaje mejor y más simple que otro, quizá no (Popper, 1985: 65).

Esta actitud le impide calibrar la importancia que tiene para la mecánica cuántica (y no sólo para la interpretación de Copenhague o cualquier otra) el problema de los conceptos clásicos, los límites objetivos de su uso y su inevitabilidad debido a la ausencia de alternativas concebibles e nociones tales como espacio, tiempo, masa o energía. No reconocerlo así obliga a Popper a recaer en el *realismo ingenuo,* descartando el modelo ondulatorio y aferrándose al corpuscular (Popper, 1985: 33) y negándose a aceptar la no-localidad cuántica (Popper, 1985: 47). Es curioso como una tesis aparentemente relativista (la intercambiabilidad de los sistemas conceptuales) aboca a una concepción absolutista, en el sentido de que no se reconoce la existencia de límites objetivos al uso de un sistema conceptual dado (el de la física clásica), lo cual a su vez convierte el realismo ingenuo que se niega a renunciar a tales conceptos en una forma de idealismo solapado. En el experimento de la doble rendija, la exigencia de pretender que el electrón *siempre* está localizado, parece obligar a conferirle una suerte de conocimiento de si la rendija *por la que no pasó* estaba cerrada o abierta. Para evitar esta caída en lo subjetivo Popper afirma, en cierto modo que quien «sabe» no es el electrón, sino el dispositivo experimental en su conjunto:

> Así, la partícula pasará a través de una sola ranura y, en cierto sentido, permanecerá imperturbada por la otra ranura. En lo que influye la otra ranura es en las propensiones de la partícula relativas a toda la disposición experimental, no a la partícula en sí: las propensiones a alcanzar uno u otro punto en la segunda pantalla (Popper, 1985: 169).

Simplificando al máximo mi réplica, pregunto: ¿Qué más da que quien «sepa» (que la otra ranura está abierta o cerrada) sea la partícula que atraviesa la ranura o la ranura que es atravesada por la partícula? El uso de los conceptos clásicos siempre acaba obligando a confundir las fronteras de lo objetivo y lo subjetivo, de manera que, o relativizamos el valor de verdad de los conceptos clásicos como hacen Bohr y Heisenberg, o acabamos otorgando a la realidad que hemos identificado con dichos conceptos prerrogativas psíquicas y aptitudes portentosas.

Mario Bunge ha sido uno de los autores más beligerantes contra las concomitancias subjetivo-idealistas de la teoría. Su diagnóstico se basa en la pretensión se que encierra un último tipo de dualidad (físico-filosófica) que hay que depurar para, al menos en este aspecto, retornar a un planteamiento no dual:



> La mecánica cuántica, probablemente la más potente de todas las teorías científicas, es también la de filosofía más débil. Esta debilidad reside básicamente en la incapacidad de enunciar inambigua y persuasivamente cuáles son los referentes genuinos de la teoría. Y esta incapacidad deriva de un deseo de complacer a una filosofía que oscila entre el subjetivismo no diluido y el realismo íntegro (Bunge, 1978, 110).

El elemento «filosófico» incorporado por le Interpretación de Copenhague y otras constituiría una adherencia parásita, apta tan sólo para producir confusión y error. La única estrategia recomendable para remediarlo es proceder a una radical depuración que elimine tales añadidos:

> La receta para construir versiones estrictamente físicas de la MC es ésta: «Tómese la formulación estándar, púrguesela de sus elementos subjetivistas, y finalmente reorganícese lógicamente lo que queda». Los elementos subjetivistas son, desde luego, el concepto de observador y todas las nociones relacionadas con él, particularmente las de observable y propiedad subjetiva (Bunge, 1978, 117).

Nótese que, mientras Einstein, Planck, Schrödinger, De Broglie, Bohm, etc., cuestionaban la formulación estándar misma, por las restricciones que imponían a la vigencia del principio causal, Bunge respeta dicha formulación (y por tanto asume las restricciones), pero objeta la *presentación* que se da a la teoría y propone *liberarla* de contaminaciones espurias. Se trata, por tanto, de un asunto más bien *cosmético,* sin pretender disminuir la trascendencia que ello pueda tener. Uno no deja de lamentar que la filosofía se haya visto reducida a ser algo así como una leve costra de liquen que afea la nobleza de las piedras que cubre y engaña a los incautos, haciéndoles creer que la consistencia de lo que hay debajo es muy otra. Se añoran los tiempos en que la filosofía era tosca pero fuerte herramienta capaz de hendir esas mismas piedras y descubrir lo que contenía su interior. Más arriba sostuve que la reformulación del principio causal (o de su aplicabilidad) llevado a cabo por la mecánica cuántica no se aplica únicamente a la propia teoría que hace uso de él, sino que de alguna manera afecta a los conceptos fundamentales que forman el esqueleto semántico de las teorías físicas pasadas (las clásicas), presentes (la propia mecánica cuántica) y ¿futuras? (en la medida que no sepan forjar nociones alternativas más poderosas o como mínimo menos hipotecadas por las relaciones heisenberguerianas de indeterminación). Un primer balance de los 80 años largos que han pasado desde que fue propuesta confirma esta expectativa, puesto que salvo la insólita (y ya amenazada) supervivencia de la teoría de la relatividad general, no aparece en la selva de las ciencias físico-químicas ninguna planta o retoño que no pertenezca a la estirpe cuántica.

Bunge ha juzgado imperativo renovar las bases conceptuales de la física, no ya para hacer realidad los sueños de Einstein y de quienes quisieron llegar más lejos que Bohr y Heisenberg, sino para ejercer la salutífera depuración que aconseja. La piedra angular del nuevo edificio sería la noción de *cuantón,* que suplantaría con ventaja los términos demasiado desgastados de *onda* y *corpúsculo* (Bunge, 1967). Enriquecen el reforzado panorama semántico otros conceptos novedosos, como el de *hylón* y *pedión* (Bunge, 1978: 144). Ya he confesado antes mi reticencia a aceptar de no mediar poderosas razones una nueva (¿y cuántas van?) revolución léxica, pero en este caso exacerba mi pereza lo poco que se me promete si la venzo:

.

> En cualquier caso, tenga o no análogo clásico una fórmula cuántica, no debería interpretarse en términos clásicos sino según los axiomas de interpretación de la teoría. Y estas suposiciones (denominadas también «reglas de correspondencia» y en ocasiones «definiciones operacionales») deberían ser literales antes que metafóricas, a la par que objetiva antes que centrada en el observador. [...] [Cuando se emplean conceptos referentes al observador] entonces T será una teoría psicofísica más bien que estrictamente física. [...] cuanto más persistan en emplear imágenes heurísticas tanto menos comprenderán la teoría (Bunge, 1978: 146-9).

Es difícil sustraerse a la impresión de que la propuesta de Bunge supone un mero «maquillaje» sin consecuencias prácticas. Nada tiene que ver con la experiencia ni tampoco con su valoración, sólo con lo que le gusta o disgusta con respecto a la supuesta tara especulativa o lingüística de las teorías. Los términos que introduce no sirven para llegar más lejos, sino simplemente para «barrer debajo de la alfombra» los elementos que encierran connotaciones subjetivistas, aunque, por otro lado, viene a reconocer que dichos elementos tienen o tuvieron una componente *heurística* que ahora ya parece devaluada, puesto que la teoría ha entrado en una fase donde es más importante «comprenderla» que proseguirla con heurísticas discutibles desde la ortodoxia objetivista que Bunge y otros filósofos de la ciencia defienden. Es llamativo el empeño que muchos autores han puesto para «borrar» al sujeto de la interpretación de la mecánica cuántica, una vez que su «presencia» no fue estorbo para que los creadores de la teoría hicieran su trabajo (con seguridad uno de los más arduos de toda la historia de la ciencia). La más paradójica interpretación de la mecánica cuántica es la de los muchos universos, y para justificarla David Deutsch argüía en 1986:

> La interpretación de de Everett es la única en la que se considera que el observador es una parte intrínseca del universo que él está midiendo (Davies, Brown, 1989: 124).

Puede que eso sea un gran mérito, mas sin duda nunca se ha pagado un precio mayor para obtenerlo, ni creo que tampoco se haga en el futuro: nada menos que desdoblar la realidad hasta límites inimaginables. Todos sabemos que las interferencias subjetivas constituyen un impedimento mayor para lograr mantener la objetividad de una investigación. Sin embargo Rudolf Peierls, otro gran conocedor de la teoría, puso en mi opinión el dedo en la llaga cuando observó: «Mire, la descripción cuántica se realiza en términos del conocimiento. Y el conocimiento requiere alguien que conozca» (Davies, Brown, 1989: 102). Cualquiera compartirá de todo corazón la aversión a que el «yo» se inmiscuya en la formulación de una teoría física y amenace con asumir cierta eficacia causal en la marcha de los acontecimientos físicos, cuando no un papel protagonista. Pero al mismo tiempo nadie puede negar que el sujeto cognoscente representa una (cuando no «la») condición de posibilidad de cualquier empresa cognitiva. Pretender prescindir de él recuerda a la historia de la compañía ferroviaria que, vistas las estadísticas de accidentes, decidió suprimir el «último vagón» de sus trenes, porque en él la probabilidad de descarrilamiento era mayor.

Resulta incómodo que la indeterminación (más bien la determinación aleatoria) en la descripción de los eventos físicos venga siempre acompañada de un acto de objetivación efectuado por un sujeto cognoscente (sin perjuicio de que recurramos a otros factores más objetivos, como desdoblamiento de universos, de coherencia cuántica, etc.). ¿Hay que echar al sujeto la culpa de que desaparezca el entrelazamiento cuántico, aflore la no-localidad, se pierda buena parte de la información, se actualice alguna de las posibilidades presentes y se eliminen



todas las demás, etc.? Lo cierto es que las cosas habrían ocurrido de otro modo si no se hubiese producido esa intervención. Mírese como se mire, eso suena a eficacia causal. No es un enigma fácil de solucionar y mucho menos en el presente contexto. Me permitiré a pesar de todo una pequeña sugerencia. Para mantener al sujeto cognoscente alejado de los procesos, digamos, *físicos,* habría que exigir que éstos no se entremezclaran con los procesos *cognitivos* en cuanto tales, aunque, como es obvio, todo proceso cognitivo *también* es un proceso físico (si quien lo ejerce es un animal o un ser humano y no un espíritu puro). Pero esta cómoda regla de oro que ordena la separación se rompió en el mismo momento en que se empezó a no distinguir con claridad la realidad misma de lo físico con los conceptos que usamos para objetivarla. Eso ocurre cuando se confunde «el electrón mismo, propiamente dicho» con un corpúsculo, una onda, o bien la ecuación de Schrödinger que describe su comportamiento antes de objetivarse como tal. Al hacerlo, ya hemos introducido al sujeto cognoscente en el *proceso físico*, convirtiéndolo *eo ipso* en un *proceso físico-cognitivo*. Nada más lógico que la presencia del cognoscente *dentro del proceso estudiado* acabe objetivándose también. Para mantener al sujeto fuera de las ecuaciones (o de su colapso) habría que renunciar a intercambiar entre si la realidad y los conceptos. Pero en ese caso habría que detenerse antes de que los efectos distorsionantes del cuanto universal de acción alcancen una magnitud comparable con la de los trocitos de universo que pretendemos conocer. La mecánica cuántica ha asumido el reto de intentar llegar más lejos de lo que esos conceptos dan objetivamente de sí. Lo menos que cabría esperar es cierta fusión de la instancia cognoscente y la conocida. Otro de los protagonistas del debate, John Taylor, comentaba:

> Tengo muchas dudas sobre la interpretación en términos de conciencia principalmente porque le lleva a uno a una regresión infinita (Davies, Brown, 1989: 155).

Es completamente natural, puesto que la regresión infinita es una marca de la casa cuando la conciencia está de por medio. La única forma de evitarlo es dejarla fuera del campo de estudio; pero para eso tendríamos que renunciar a trabajar con conceptos que claramente han sobrepasado su fecha de caducidad.

10. Conclusión: causalidad y azar en el mundo cuántico

El advenimiento de la mecánica cuántica ha revolucionado el panorama de las ciencias de la naturaleza, pero tampoco son de despreciar las repercusiones filosóficas que ha tenido, tanto en el orden ontológico como en el cognitivo. Todavía no está nada claro cuáles serán sus efectos en esos dos ámbitos, puesto que ni la ontología ni la teoría del conocimiento han acabado todavía de digerir su presencia. Por el momento es más sencillo señalar qué cosas habrá que plantear de manera muy diferente a como hasta ahora se había hecho. Es incuestionable que ha problematizado seguramente para siempre ciertas escisiones que se habían convertido en otras tantas vacas sagradas de nuestra cultura. La primera es la separación tajante entre lo objetivo y lo subjetivo, pero también entre lo contingente y necesario, causal y azaroso, ontológico y epistemológico, etc. Sería equivocado concluir que, dado que tales divisiones sen menos nítidas de lo que se presumía, lo mejor sería prescindir por ellas y sustituirlas por

otras. Equivocado porque, por otro lado, la principal enseñanza de la mecánica cuántica es cómo avanzar cuando no existen recambios para piezas cruciales defectuosas. Cómo precisar con conceptos borrosos, cómo ser objetivos en contextos permeables a lo subjetivo, cómo no renunciar a un criterio realista de verdad allí donde no parece haber más que mediaciones de todo tipo. Por primera vez en dos siglos una generación de investigadores supo asumir un desafío ante el que flaqueó nada menos que Immanuel Kant: mantener contra viento y marea los puntos de anclaje del mundo fenoménico en la realidad de lo en sí.

En lo que se refiere a los conceptos de causa y azar, hemos podido descubrir que sus relaciones son mucho más sofisticadas de lo que científicos y filósofos habían sido capaces de concebir. Hay causas y también leyes, y las conexiones que forjan son verdaderamente eficaces, pero también multidimensionales. El contingentismo radical, el determinismo reduccionista, la separación tajante de diversos ámbitos sometidos a principios y leyes desconectados, son ejemplos de opciones teóricas que probablemente hayan quedado desbancadas para siempre por obra y gracia de esta teoría. Admitir eso suponía para Einstein pensar que Dios, más que sutil, era malvado. Pero probablemente minusvaloró la capacidad de la mente humana para profundizar en esquemas realmente sofisticados. Y para que en el mundo quepa todo lo que hemos ido descubriendo que contiene, es imprescindible renunciar a esquemas causales y legales demasiado simples. Y el de Einstein, como el de la ciencia y la filosofía de su época, lo era. Mientras no consigamos enriquecerlo, la comprensión cabal de la mecánica cuántica seguirá siendo una tarea pendiente.

Bibliografía citada

Arana, J., «¿Es idealista la Interpretación de Copenhague de la mecánica Cuántica?», *Ontology Studies* 1 (2000), págs. 185-202.
CC, *Materia, Universo, Vida,* Madrid, Tecnos, 2001.
Bohr, N., *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza,* Madrid, Alianza, 1988.
Davies, P. C. W., Brown, J. R., *El espíritu en el átomo,* Madrid, Alianza, 1989.
Deutsch, D., *La estructura de la realidad,* Barcelona, Anagrama, 2002.
Einstein, A., *Sobre la teoría de la relatividad,* Madrid, Sarpe, 1983.
Einstein, A., Born, M., *Correspondencia (1916-1955),* México, Siglo XXI, 1973.
d'Espagnat, B., *En busca de lo real. La visión de un físico,* Madrid, Alianza, 1983.
Forman, P., *Cultura en Weimar, causalidad y teoría cuántica 1918-1927. Adaptación de los físicos y matemáticos alemanes a un ambiente hostil,* Madrid, Alianza, 1984.
Heisenberg, W., *La imagen de la naturaleza en la física actual,* Barcelona, Seix Barral, 1969.
——, *Diálogos sobre la física atómica,* Madrid, B.A.C., 1972.
——, *Más allá de la física. Atravesando fronteras,* Madrid, B.A.C., 1974.
Hooft, G., *Partículas elementales. En busca de las estructuras más pequeñas del universo,* Barcelona, Crítica, 2001.
Landé, A., *Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica,* Madrid, Tecnos, 1968.
Planck, M., *¿Adónde va la ciencia?,* Buenos Aires, Losada, 1961.
Popper, K., *Post Scriptum a la Lógica de la investigación científica.* Vol. III. *Teoría cuántica y el cisma de la Física,* ed. de W.W. Bartley III, Madrid, Tecnos, 1985.
Rosenblum, B., Kuttner, F., *El enigma cuántico. Encuentros entre la física y la conciencia,* Barcelona, Tusquets, 2010.
Schrödinger, E., *La mente y la materia,* Madrid, Taurus, 1958.
——, *¿Qué es una ley de la naturaleza?,* México, F.C.E., 1975.
Smolin, L., *Las dudas de la física en el siglo XXI. ¿Es la teoría de cuerdas un callejón sin salida?,* Barcelona, Crítica, 2007.

